УДК 622.28:624.046

А.Е.ХЛУСОВ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, hlusoff@rambler.ru*
Д.Н.ДЕМЁХИН, *младший научный сотрудник, demehin2009@rambler.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.E.KHLUSOV, *PhD in eng. sc., senior research assistant, hlusoff@rambler.ru*
D.N.DEMEKHIN, *junior research assistant, demehin2009@rambler.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕПОЛИМЕРНЫХ АНКЕРОВ ПРИ КРЕПЛЕНИИ СЛОИСТОЙ КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ ПО ПРИНЦИПУ СШИВАНИЯ СЛОЕВ

Предложен приближенный метод определения необходимых параметров сталеполимерной анкерной крепи, устанавливаемой в слоистой нетрещиноватой кровле горной выработки, основанный на использовании закономерностей теории изгиба балок. Рассмотрен пример расчета.

Ключевые слова: слоистая неоднородна кровля, сталеполимерная анкерная крепь.

APPROXIMATE CALCULATION OF PARAMETERS OF STEELPOLYMER ANCHOR IN THE SUPPORT OF STRATIFIED ROOF OF THE WORKING ON THE PRINCIPLE OF FASTENING LAYERS TOGETHER

In the article it is suggested the approximate method for the determination of required parameters of steelpolymer anchors supported in. the stratified non-fissured roof of the mine working based on the use of regularities of the beam bending theory. An example of parameters calculation is given.

Key words: stratified nonhomogeneous roof; steelpolymer anchorage.

Встречающийся в горной практике случай, когда в непосредственной кровле выработки залегают слои нетрещиноватых пород относительно одинаковой мощности и прочности (нет «пород-мостов»), не является редким. В такой ситуации крепление анкерами относительно устойчивых пород экономически выгодно производить по принципу сшивания слоев в единую плиту, поскольку в этом случае плотность крепи можно уменьшить, так как здесь нагрузка на анкеры определяется не весом закрепленных пород, а силами взаимодействия скрепленных слоев, обладающих некоторой несущей способностью. В работе предпринята попытка упрощенно определить параметры такой анкерной крепи, используя теорию изгиба балок, поскольку расчет слоистой кровли как многослойной плиты, испытывающей цилиндрический изгиб, можно свести к расчету многослойной балки [1].

Сначала разберем случай, когда непосредственная кровля горной выработки (рис.1) представлена только двумя слоями пород, которые стремятся отслоиться друг от друга на величину, равную на середине пролета

$$\Delta f = f_н - f_в, \qquad (1)$$

где $f_н$ и $f_в$ – прогибы слоев в середине пролета соответственно нижнего и верхнего.

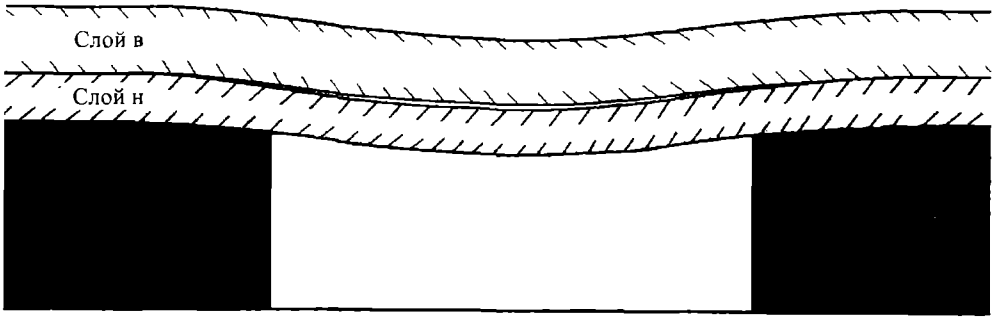


Рис.1. Расслаивающаяся двухслойная потолочина в кровле горной выработки

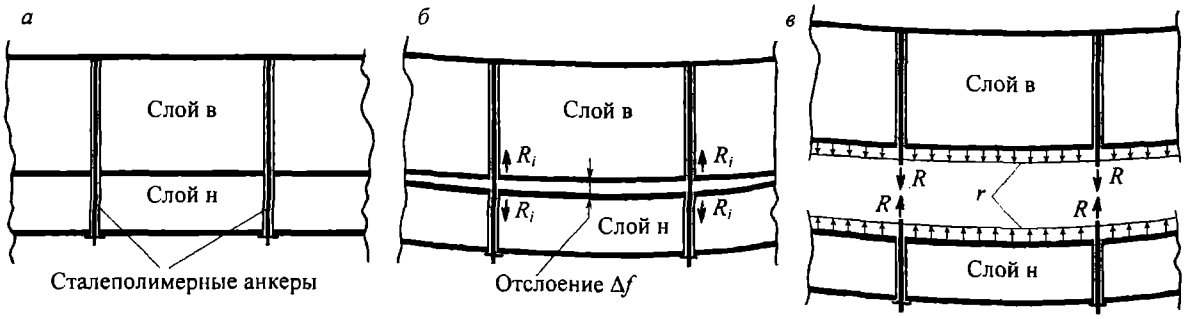


Рис.2. Схема к расчету параметров анкерной крепи, скрепляющей два породных слоя

Если не учитывать возникающее трение на контакте слоев, то прогибы $f_н$ и $f_в$ слоев как защемленных балок, находящихся под действием своего веса и некоторой пригрузки, могут быть найдены из известных решений:

$$f_н = A\frac{(1+k_{пр})\gamma_н h_н 1\ell^4}{E_{ин}I_н};$$

$$f_в = A\frac{(1-k_{пр})\gamma_в h_в 1\eta^4\ell^4}{E_{ив}I_в}, \qquad (2)$$

где $h_н$ и $h_в$, $\gamma_н$ и $\gamma_в$, $E_{ин}$ и $E_{ив}$, $I_н$ и $I_в$ – соответственно, мощность нижнего и верхнего слоев, удельный вес и модуль деформации их пород при изгибе, моменты инерции слоев; ℓ – пролет выработки; A – коэффициент, определяющийся конструкцией опор и видом действующей нагрузки; $k_{пр}$ – коэффициент, равный 0-0,5 и учитывающий возможную пригрузку нижнего слоя верхним и, соответственно, подпор верхнего слоя нижним, условно считая эти нагрузки равномерно распределенными [2]; 1 единица длины выработки; η коэффициент уменьшения пролета верхнего слоя кровли по сравнению с нижним слоем [3],

$$\eta = \frac{\ell - h_в}{\ell} \qquad (3)$$

Скрепим эти слои (до того момента, как они прогнулись) сталеполимерными анкерами, закрепленными скрепляющим составом в шпурах по всей длине (рис.2, *а*). По мере прогиба этих пород анкеры будут препятствовать возникновению отслоения и на контакте расходящихся слоев станут испытывать растягивающие (выдергивающие) нагрузки R_i, значение которых пропорционально величине отслоения около анкеров, а значит максимально на середине пролета выработки и минимально у ее боков (рис.2, *б*). Строгое решение задачи нахождения величин R_i требует обязательного учета в расчетной схеме совместной работы скрепленных пород и крепи с момента их нагружения [4], это дает величину отслоения, меньшую определяемой по формуле (1). Получаемые при этом формулы громоздки и неудобны для практического использования. С целью их упрощения сделаем следующие допущения: параметры всех анкеров будем находить, исходя из максимального отслоения пород на середине вы-

работки (это идет в запас прочности), за которое примем величину Δf согласно формуле (1). Таким образом, примем, что на все анкеры действует одинаковая выдергивающая сила R (рис.2, *в*). Последнее допущение позволяет приближенно считать, что при этом от анкеров на слои кровли прикладывается противоположно направленная равномерно распределенная по ширине выработки нагрузка

$$r = \frac{2}{3}\frac{Rn}{b\ell}\cdot 1, \qquad (4)$$

где n – количество анкеров в ряду; b – расстояние между рядами; 2/3 – коэффициент, учитывающий изменение величины отслоения пород по пролету выработки, в первом приближении принимаемое происходящим по закону квадратной параболы.

В результате нижний слой в середине пролета поднимется на некоторую величину $\Delta f_н$, а верхний – опустится на некоторую величину $\Delta f_в$, которые соответственно равны:

$$\Delta f_н = A\frac{r\ell^4}{E_{ин}I_н},\ \Delta f_в = A\frac{r\ell^4}{E_{ив}I_в}, \qquad (5)$$

причем

$$\Delta f_н + \Delta f_в = \Delta f \qquad (6)$$

Решив уравнения (1) – (6) как систему и учитывая значения моментов инерции слоев, найдем величину натяжения анкеров, условно допуская возникновение отслоения на величину Δf:

$$R = \frac{3}{2}\frac{b\ell}{n}r, \qquad (7)$$

где

$$r = \frac{(1+k_{пр})\gamma_н h_н - (1-k_{пр})\gamma_в h_в \eta^4 \dfrac{E_{ин}h_н^3}{E_{ив}h_в^3}}{1+\dfrac{E_{ин}h_н^3}{E_{ив}h_в^3}} > 0. \qquad (8)$$

Анкеры испытывают натяжение, если величина r, определяемая зависимостью (8), имеет положительное значение; в противном случае они не нагружены, поскольку слои не отталкиваются, а прижимаются друг к другу (принимается, что анкеры не способны сопротивляться перерезывающим нагрузкам).

По условию прочности действующая на анкер нагрузка не должна превышать его несущую способность $P_{н\text{-}в}$, из чего следует искомое соотношение для расчета необходимой плотности установки анкерной крепи

$$П = \frac{n}{b\ell} = \frac{3}{2}\frac{k_з r}{P_{н-в}}, \qquad (9)$$

где $k_з$ – коэффициент запаса, учитывающий в том числе реологическое снижение деформационных и прочностных характеристик системы, $k_з$ = 1,3-2,0. Несущая способность анкера $P_{н\text{-}в}$ определяется опытным или (при наличии необходимых данных) расчетным путем [5] и представляет собой минимальную величину из нагрузок, при которых происходит или разрыв анкерного стержня, или его выдергивание из шпура данной длины, пробуренного в конкретной породе (в нашем случае – в породе нижнего и верхнего слоев).

Длина анкеров определяется суммарной мощностью сшиваемых слоев Σh_i, обеспечивающей необходимую несущую способность кровли, и может быть найдена на основе теории расчета неоднородных слоистых балок следующим образом [6]. Задается количество скрепляемых слоев пачки, она принимается полностью расслоившейся, а для каждого из ее слоев проверяется выполнение условия прочности:

$$(\sigma_и)_i = \left(\frac{M^{max}}{\sum E_{ии}I_i}\right)E_{ии}h_i k_i(1+k_п) < \frac{(\sigma_и^{пч})_i}{k_з}, \qquad (10)$$

где $(\sigma_и^{пч})_i$ и $(\sigma_и)_i$ – соответственно прочность на изгиб данного породного слоя мощностью h_i и величина действующих в нем растягивающих напряжений изгиба; M^{max} – значение максимального изгибающего момента, действующего на скрепленные слои, при условии их заделки на нежестких опорах (угольных целиках)

$$M^{max} = \frac{\sum \gamma_i h_i \ell^2}{16};$$

k_i – коэффициент, показывающий, какую долю от общей высоты слоя занимает растянутая зона, если в расчетах учитывать не-

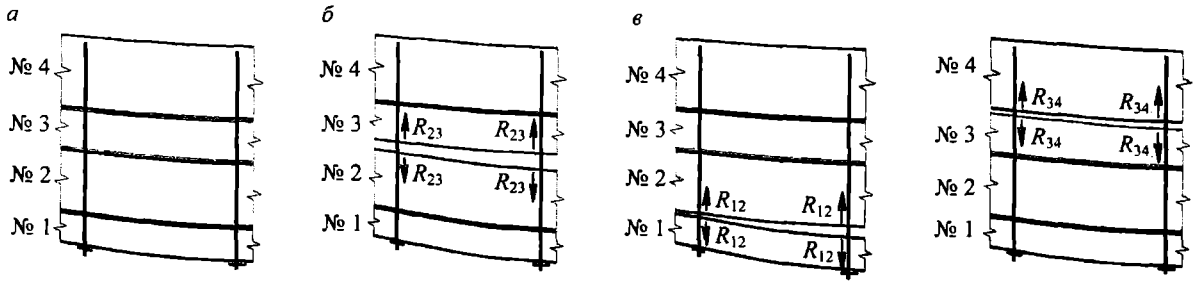


Рис.3. Схема к расчету необходимых параметров анкеров, скрепляющих четырехслойную расслаивающуюся потолочину

равенство величин модулей деформации породы при сжатии E_{ci} и растяжении E_{pi}, когда $n_i = E_{ci} / E_{pi} > 1{,}5$,

$$k_i = \frac{\sqrt{n_i}}{1+\sqrt{n_i}};$$

$E_{ии}$ – модуль деформации породы i-того слоя при изгибе, условно приведенной к породе, у которой $E_{ci} = E_{pi}$,

$$E_{ии} = 4E_{pi}[n_i(1-k_i)^3 + k_i^3];$$

$I_i = h_i^3/12$ момент инерции i-того слоя пачки; $k_п$ – коэффициент, отражающий влияние возможной пригрузки скрепленной пачки со стороны вышележащих пород [2], $k_п = 0{,}3\text{-}1{,}0$.

Если условие (10) выполняется не для всех слоев заанкерованной пачки, то в ее толщину Σh_i следует включить мощность следующего над ней породного слоя и все расчеты повторить, пока зависимость (10) не станет справедливой для всей пачки.

Полученные выражения можно использовать и тогда, когда скрепляемая анкерами пачка состоит из нескольких слоев. Покажем это на примере.

Пусть в кровле выработки (рис.3, *а*) согласно условию (10) необходимо заанкеровать четыре разнородных породных слоя (расчеты, показывающие это, опускаем). Здесь под термином слои будем понимать отдельности, на которые происходит расслоение пачки по плоскостям ослабления, поэтому положение этих плоскостей необходимо знать. Сравнение величин прочностей контактов на сдвиг (или растяжение) покажет примерную очередность их разрушения. Допустим, при незакрепленной кровле оно происходит в следующей последовательности: сначала между слоями № 2 и № 3, затем – между слоями № 1 и № 2 и, наконец, между слоями № 3 и № 4. Первое возможное отслоение пород приведет к тому, что установленные анкеры начнут испытывать растягивающие нагрузки в районе контактов слоев № 2 и № 3 так, как это показано на рис.3, *б*. В этом случае, приняв за нижнюю условную балку слои пород № 1 + № 2 (суммарно), а за верхнюю – породы № 3 + № 4, по формулам (8) и (9) получим:

$$r_{12-34} = \frac{(1+k_{пр1})(\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2)}{1+\dfrac{E_{и1}h_1^3 + E_{и2}h_2^3}{E_{и3}h_3^3 + E_{и4}h_4^3}} - \frac{(1+k_{пр1})(\gamma_3 h_3 + \gamma_4 h_4)\eta_1^4 \dfrac{E_{и1}h_1^3 + E_{и2}h_2^3}{E_{и3}h_3^3 + E_{и4}h_4^3}}{1+\dfrac{E_{и1}h_1^3 + E_{и2}h_2^3}{E_{и3}h_3^3 + E_{и4}h_4^3}} > 0, \quad (11)$$

$$П_1 = \frac{n_1}{b_1 \ell} = \frac{3}{2}\frac{k_з r_{12-34}}{P_{12-34}}, \quad (12)$$

где $P_{12\text{-}34}$ – минимальное значение усилий выдергивания анкера из слоев № 1 + № 2 и № 3 + № 4.

Установив анкерную крепь плотностью $П_1$, мы обеспечиваем невозможность отслоения (не путать с расслоением) по контакту слоев № 2 и № 3. Следующее отслоение должно происходить между слоями № 1 и № 2, а значит за нижнюю балку следует принять слой № 1, за верхнюю – суммарно остальные три слоя пачки (рис.3, *в*). Тогда выражения (8) и (9) запишутся так:

$$r_{1-234} = \frac{(1+k_{пр2})\gamma_1 h_1}{1+\dfrac{E_{и1}h_1^3}{E_{и2}h_2^3+E_{и3}h_3^3+E_{и4}h_4^3}} -$$

$$-\frac{(1-k_{пр2})(\gamma_2 h_2+\gamma_3 h_3+\gamma_4 h_4)\eta_2^4}{1+\dfrac{E_{и1}h_1^3}{E_{и2}h_2^3+E_{и3}h_3^3+E_{и4}h_4^3}} \times$$

$$\times \frac{\dfrac{E_{и1}h_1^3}{E_{и2}h_2^3+E_{и3}h_3^3+E_{и4}h_4^3}}{1+\dfrac{E_{и1}h_1^3}{E_{и2}h_2^3+E_{и3}h_3^3+E_{и4}h_4^3}} > 0; \quad (13)$$

$$П_2 = \frac{n_2}{b_2 \ell} = \frac{3}{2}\frac{k_з r_{1-234}}{P_{1-234}}, \quad (14)$$

где $P_{1\text{-}234}$ – минимальное значение усилия выдергивание анкера из слоя № 1 и из слоев № 2 + № 3 + № 4.

Приняв параметры крепи b_2 и n_2 (если $П_2 > П_1$), мы обеспечим отсутствие отслоения самого нижнего слоя пачки. Образование последнего потенциального отслоения (между слоями № 3 и № 4) возможно, если три нижних скрепленных слоя суммарно обладают меньшей жесткостью, чем одиночный слой № 4 (рис.3, *г*), и, значит, условие (8) будет выполняться. Это требует проверки, поэтому запишем:

$$r_{123-4} = \frac{(1+k_{пр3})(\gamma_1 h_1+\gamma_2 h_2+\gamma_3 h_3)}{1+\dfrac{E_{и1}h_1^3+E_{и2}h_2^3+E_{и3}h_3^3}{E_{и4}h_4^3}} -$$

$$-\frac{(1-k_{пр3})\gamma_4 h_4 \eta_3^4 \dfrac{E_{и1}h_1^3+E_{и2}h_2^3+E_{и3}h_3^3}{E_{и4}h_4^3}}{1+\dfrac{E_{и1}h_1^3+E_{и2}h_2^3+E_{и3}h_3^3}{E_{и4}h_4^3}} > 0; \quad (15)$$

$$П_3 = \frac{n_3}{b_3 \ell} = \frac{3}{2}\frac{k_з r_{123-4}}{P_{123-4}}, \quad (16)$$

где $P_{1\text{-}234}$ – минимальное значение усилия выдергивание анкера из слоев № 1 + № 2 + + № 3 и слоя № 4.

За окончательные принимаются параметры анкерной крепи с наибольшей плотностью установки $П_0$, т.е. из значений выражений (12), (14) и (16) выбирается максимальное:

$$П_0 = \frac{n_0}{b_0 \ell} = \max\{П_1; П_2; П_3\} = \max\{П_j\}. \quad (17)$$

Покажем использование полученных формул (11)-(17) на конкретном числовом примере. Допустим, характеристики четырех нижних слоев кровли штрека ($\ell = 6$ м), которые нужно закрепить анкерами, определяются следующими величинами:

Слой	4	3	2	1
h_i, м	0,45	0,35	0,5	0,3
γ_i, МН/м^3	0,026	0,025	0,023	0,023
$E_{иi}$, МПа	$1{,}5\cdot10^4$	$1{,}3\cdot10^4$	$1{,}0\cdot10^4$	$0{,}9\cdot10^4$

Для расчета по формулам (11) и (12) будем иметь (рис.3, *б*): $k_{пр} = 0{,}2$ (поскольку здесь нижняя двухслойная и верхняя двухслойная балки имеют примерно равную жесткость [2]); $\eta_1 = [6\text{-}(0{,}35 + 0{,}45)]/6 = 0{,}87$; $k_з = 1{,}5$; $P_{12\text{-}34} = 0{,}08$ МН. В результате получаем:

$$r_{12\text{-}34} = 0{,}0084 \text{ МН/м} > 0; \; П_1 = 0{,}24 \text{ анк/м}^2$$

Вычисления по формулам (13) и (14) (рис.3, *в*): $k_{пр} = 0{,}1$; $\eta_2 = [6 - (0{,}5 + 0{,}35 + + 0{,}45)]/6 = 0{,}78$; $k_з = 1{,}5$; $P_{1\text{-}234} = 0{,}05$ МН) дают

$$r_{1\text{-}234} = 0{,}0063 \text{ МН/м} > 0, \; П_2 = 0{,}28 \text{ анк/м}^2$$

Проверка выражений (15) и (16) при исходных данных, рис.3, *г*: $k_{пр} = 0{,}2$; $\eta_3 = [6 - 0{,}45] / 6 = 0{,}93$; $k_з = 1{,}5$; $P_{123\text{-}4} = 0{,}065$ МН приводит к следующим результатам:

$$r_{123\text{-}4} = 0{,}0089 \text{ МН/м} > 0; \; П_3 = 0{,}31 \text{ анк/м}^2$$

В итоге, как видим, плотность анкерования согласно выражению (17) необходимо принять равной $П_0 = 0{,}31$ анк/м^2 (например, когда $n_0 = 3$, $b_0 = 1{,}6$ м). Такая выгодно небольшая плотность установки анкеров возможна только при условии залегания в кровле выработки нетрещиноватых устойчивых пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Борисов А.А.* К определению нагрузки на крепь горизонтальных выработок при разработке угольных месторождений // Записки Ленинградского горного института. Т.30. Вып.I. Л., 1955.

2. *Кузнецов Г.Н.* Исследование деформаций и давлений, возникающих в многослойной консоли кровли, и взаимодействие ее с крепью / Тр. ВНИИ горн. геомех. и маркшейд. дела. М.: Госгортехиздат, 1960. Сб.34. С.3-43.

3. *Кузнецов Г.Н.* Определение полной несущей способности кровли подземных выработок / Тр. ВНИИ горн. геомех. и маркшейд. дела. Л., 1950. Сб.22. С.231-259.

4. *Хлусов А.Е.* Расчет параметров анкеров при креплении широких выработок // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2009. № 4. С.70-76.

5. *Хлусов А.Е.* К расчету несущей способности сталеполимерного анкера // Вестник Магнитогорского ГТУ им. Г.И.Носова. 2009. № 1. С.88-91.

6. *Хлусов А.Е.* Прогноз допустимого прогиба неоднородной слоистой кровли горной выработки, закрепленной анкерами: Афторф. дис... канд. техн. наук / ВНИМИ. СПб, 2007.

REFERENCES

1. *Borisov A.A.* On the determination of loading on the support of horizontal workings in coal deposit mining // Proceeding of Mining Institute. Vol.30. P.1. Leningrad, 1955.

2. *Kuznetsov G.N.* Investigation of deformations and pressures occurring in multilayer cantilever of the roof and its inter action with the support // Proc. VNIMI. Moscow: Gosgortechizdat, 1960. Vol.34, P.3-43.

3. *Kuznetsov G.N.* Determination of total bearing capacity of the roof of underground workings // Proc. VNIMI. Leningrad, 1950. Vol.22. P.231-259.

4. *Khlusov A.E.* Calculation of anchor parameters for support of wide workings // The Latest News of Higher Educational Institutions. Mining Journal. 2009. N 4. P.70-76.

5. *Khlusov A.E.* On calculation of the supporting strength of steelpolymer anchor // Vestnik MSTU named after G.I.Nosov. 2009. N 1. P.88-91.

6. *Khlusov A.E.* Prediction of allowable deflection of nonhomogeneous stratified roof of the mine working supported with anchors: Synopsis of thesis / VNIMI. Saint Petersburg, 2007.